

doi: 10.12097/gbc.2023.12.030

孙家全, 崔健, 刘润, 宋万兵, 孙秀波. 2025. 基于多种方法的赤峰市撰山子矿区资源环境承载力评价[J]. 地质通报, 44(7): 1285–1293.

Sun Jiaquan, Cui Jian, Liu Run, Song Wanbing, Sun Xiubo. 2025. Evaluation of resource environmental carrying capacity in Zhuanshanzi mining area in Chifeng City based on various methods[J]. Geological Bulletin of China, 44(7): 1285–1293(in Chinese with English abstract).

基于多种方法的赤峰市撰山子矿区资源环境承载力评价

孙家全^{1,2,3}, 崔健¹, 刘润¹, 宋万兵¹, 孙秀波^{1,2,3*}

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 自然资源部黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034; 3. 辽宁省黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034)

摘要:【研究目的】在中国大力倡导绿色矿山的背景下, 矿产资源开发利用理应受到资源环境的限制, 开展矿山资源环境承载力评价是打造绿色矿山、实现矿业高质量发展的重要依据。【研究方法】为客观分析撰山子矿区资源环境承载力, 筛选了内蒙古赤峰市撰山子矿区资源环境承载力评价指标, 提出了以“资源+环境+社会”为框架的评价指标体系, 并分别进行了撰山子矿区资源环境承载力资源本底、环境本底和状态评价。【研究结果】根据资源承载本底评价, 四矿段承载力最低, 六矿段承载力最高, 说明四矿段矿产资源可利用量最低; 根据环境承载本底评价, 四、五、六、七矿段承载力等级相同, 说明矿区地质环境、生态环境稳定, 为矿区开发打下了良好的环境基础; 根据承载状态评价, 六矿段承载力最高, 四、五、七矿段承载力等级相同, 说明矿区承载状态均未发生超载, 未对周边环境产生明显的影响。【结论】本文创新性地将资源禀赋、环境状况和社会发展状态纳入矿区资源环境承载评价体系。根据评价结果, 撰山子矿区整体资源环境承载力处于高水平, 矿区各矿段资源环境现状良好, 评价结果具有真实性、完整性和全面性。开展矿区资源环境承载能力评价, 对于促进矿山资源管理、环境治理及矿业开发具有现实意义, 也为今后矿业开发前矿区资源环境承载力研究提供重要依据。

关键词: 矿区; 资源环境; 承载力; 多种方法; 指标体系; 内蒙古

创新点: 创新性地将资源禀赋、环境状况和社会发展状态纳入矿区资源环境承载力评价体系, 形成“资源+环境+社会”的多元评价体系, 使自然资源环境系统与社会经济系统之间联系更加紧密, 评价结果更加符合生态文明建设下的可持续发展理论。

中图分类号: P61; X141 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)07-1285-09

Evaluation of resource environmental carrying capacity in Zhuanshanzi mining area in Chifeng City based on various methods

SUN Jiaquan^{1,2,3}, CUI Jian¹, LIU Run¹, SONG Wanbing¹, SUN Xiubo^{1,2,3*}

(1. Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China; 2. Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effect, Ministry of Natural Resources, Shenyang 110034, Liaoning, China; 3. Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effect, Liaoning Province, Shenyang 110034, Liaoning, China)

Abstract: [Objective] In the context of China's strong advocacy of green mines, the exploitation and utilization of mineral resources should be limited by resources and environment. The evaluation of mine resource and environmental carrying capacity is an important

收稿日期: 2023-12-21; 修订日期: 2024-06-06

资助项目: 中国地质调查局项目《东北振兴区资源环境承载能力监测评价》(编号: DD20221730)、《大兴安岭成矿带战略性矿产调查》(编号: DD20240061)

作者简介: 孙家全(1993-), 男, 硕士, 工程师, 从事水工环地质调查研究。E-mail: 952037388@qq.com

* 通信作者: 孙秀波(1983-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水工环地质调查研究。E-mail: 124470222@qq.com

basis for building green mines and realizing high-quality development of mining industry. **[Methods]** In order to objectively analyze the resource and environmental carrying capacity of Zhuanshanzi mining area, this paper selects the evaluation index of resource and environmental carrying capacity of Zhuanshanzi mining area, puts forward an evaluation index system with "resource + environment + society" as the framework, and evaluates the resource background, environmental background and state of resource and environmental carrying capacity of Zhuanshanzi mining area respectively. **[Results]** According to the resource carrying capacity assessment, the Fourth Mine Section has the lowest carrying capacity, while the Sixth Mine Section has the highest, indicating that the Fourth Mine Section has the least available mineral resources. Based on the environmental carrying capacity assessment, the carrying capacity levels of the Fourth, Fifth, Sixth, and Seventh Mine Sections are the same, suggesting that the geological and ecological environments of the mining area are stable, providing a solid environmental foundation for development. The carrying state assessment shows that the Sixth Mine Section has the highest carrying capacity, while the Fourth, Fifth, and Seventh Mine Sections have the same level, indicating that none of the mine sections have exceeded their carrying capacity, and there is no significant impact on the surrounding environment. **[Conclusions]** This paper innovatively incorporates resource endowment, environmental conditions, and social development status into the evaluation system for the resource and environmental carrying capacity of mining areas. The evaluation results indicate that the overall resource and environmental carrying capacity of the Chuanshanzi mining area is at a high level, with all sections of the mining area showing good current conditions. The evaluation results are authentic, comprehensive, and complete. Conducting evaluations of the resource and environmental carrying capacity of mining areas is of practical significance for promoting mine resource management, environmental governance, and mining development. It also provides important evidence for future research on the resource and environmental carrying capacity of mining areas before mining development.

Key words: mining area; resource and environment; carrying capacity; various methods; index system; Inner Mongolia

Highlights: This paper innovatively integrates resource endowment, environmental status and social development status into the evaluation system of resource and environment carrying capacity in mining areas, forming a "resource + environment + society" diversified evaluation system, which makes the relationship between natural resource and environmental system and social economic system more close, and the evaluation results are more in line with the sustainable development theory under the construction of ecological civilization.

About the first author: SUN Jiaquan, male, born in 1993, master, engineer, mainly engaged in hydrogeological survey and research. E-mail: 952037388@qq.com

About the corresponding author: SUN Xiubo, female, born in 1983, master, senior engineer, mainly engaged in hydrogeological survey and research. E-mail: 124470222@qq.com

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (Nos.DD20221730, DD20240061)

矿产资源是经济社会发展的重要物质基础,在国民经济和社会发展中具有非常重要的地位。矿产资源的开发在促进地方经济发展的同时,也会对周围环境造成多方面的影响。党的十九大以来,生态文明建设持续推进,打造绿色矿山,是实现矿业高质量发展成为矿山发展的必经之路。对矿山开展资源环境承载力评价,可以量化表达矿区资源禀赋和环境状态,预测矿山可承受开采活动强度,减少对周围环境的扰动,有效指导绿色矿山建设(赵丽娟等, 2023)。

资源环境承载能力的研究源于国外学者对承载力的研究,来源于人口统计理论(Park and Ernest, 1921)和种群生物学(Hadwen and Palmer, 1922)。20 世纪 90 年代以后,随着资源环境承载力研究不断

深入,承载对象由单一要素向多要素承载力评价发展。从评价方法看,目前存在的主要方法有系统动力学方法(许文豪等, 2020)、多目标规划方法(任建兰等, 2013)、生态足迹法(谌伟林等, 2023)、能值分析法(王秦和赵玮, 2020)、状态空间法(冉启智等, 2022)、层次分析法(吕若曦等, 2018)、模糊物元法(王宝琛, 2022)、智能算法(杨博雄等, 2023)等。目前国内关于矿区资源环境承载能力的研究相对局限(关英斌等, 2012; 武文秀等, 2022)。关于矿区资源环境承载力的研究多为开采后资源环境承载力的变化情况(补建伟等, 2016),对于矿区开发前的资源环境承载力评价较少见。关于矿区资源环境承载力的评价指标体系多以“资源+环境”为构架,未能将矿区资源环境条件带入国民社会系统中综合考虑,评

价结果片面、简单,不具有现实意义。

因此,本文以撰山子矿区为研究区,基于层次分析法(Saaty, 1977; 孙秀波等, 2022),加权指数模型(郭骏瀚等, 2023),以及最小限制因子法(刘玉玉和周典, 2014)等多种方法,综合考虑矿产资源禀赋、环境状况、社会经济发展等条件,构建“资源+环境+状态”的评价指标体系,并完成了撰山子矿区资源环境承载力综合评价,根据评价结果,探讨了矿区开发的可行性,并优化了矿区资源环境承载能力评价方法。本文通过撰山子矿区资源环境承载力评价,为国内矿区资源管理、环境治理及矿业开发提供依据。

1 地质概况

1.1 自然地理

撰山子矿区位于内蒙古赤峰市敖汉旗四道湾子镇,其范围如图 1 所示。矿区所在位置属于中温带半干旱大陆性气候区,四季分明,年平均气温 6.7℃,极端最高气温 41.7℃,极端最低气温-30.7℃;年平均降水量 433.7 mm,年平均蒸发量 2354.1 mm;年平均风速 2.5 m/s,年平均大风日数 52.4 d,历年最大风速 27.0 m/s,最大冻土深度 150 cm,年日照时数 3164.1

h, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温 2900℃,无霜期 143 d。每年 10 月末至翌年 3 月为冰冻期,最大冻土深度 2.0 m。年主导风向春夏西南风,秋冬西北风。矿区气候环境稳定,降水量较少,气候波动较小,矿区生态环境承载能力稳定。

1.2 地形地貌与地质构造

矿区地貌属中等切割低山丘陵区,山脉总体走向近南北向,海拔标高 660~844 m,区内沟谷较发育,地势较缓,坡度为 20°~40°,地貌类型单一。矿区地处张家口-赤峰金矿成矿带的东部(阴翠珍, 1992),靠近内蒙地槽与华北地台接合部位的内蒙地槽一侧。断裂构造主要发育北西向断裂,数量多,分布范围广。矿区地形地貌单一,坡缓沟浅,基础地质条件稳定。

1.3 矿区地质

矿区主要为岩金矿体,主要分布在构造破碎带内,赋矿围岩为花岗岩、花岗斑岩和流纹质凝灰岩,矿石类型为含金石英脉原生矿石,矿床成因类型为浅成中-低温热液充填型金矿床。矿区内按矿体赋存位置划分为 4 个矿段,自北西至南东编号分别为四矿段、五矿段、六矿段、七矿段(图 1)。矿区整体资源储量丰富,其中六矿段规模最大,资源储量占区内查明金矿总储量的 50% 以上,五矿段、七矿段次之,四矿段最小。此外,矿区矿体品位普遍较高,平均品位在 10 g/t 以上,属国内少有的高品位富矿床。

1.4 地质环境

矿区地处低山丘陵地段,地形地貌条件简单,地形有利于自然排水,矿体围岩属坚硬岩石,强度较高,力学性质较好,稳定性较好,在长期风化及内外应力作用下,表层风化严重,形成透水不含水风化岩层,属自然环境地质相对较脆弱地段。矿区地质构造稳定,地层力学性质较好,形成地质灾害的概率较低,地质环境稳定性好,矿区发生崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的可能性较小。

1.5 生态环境

矿区位于低山丘陵区的次一级分水岭及两侧坡麓地带,区内水系不发育,区内及周围无常年性地表径流和水体,矿区西部有老哈河流经该区域。老哈河属西辽河水系,主要特点是夏季降水增多,河水充沛,冬春季降水量下降,河水相应减少。

矿区内沟谷发育,山体大部分基岩风化裸露,第四系覆盖较薄,沟谷内多被黄土覆盖。矿区土壤类

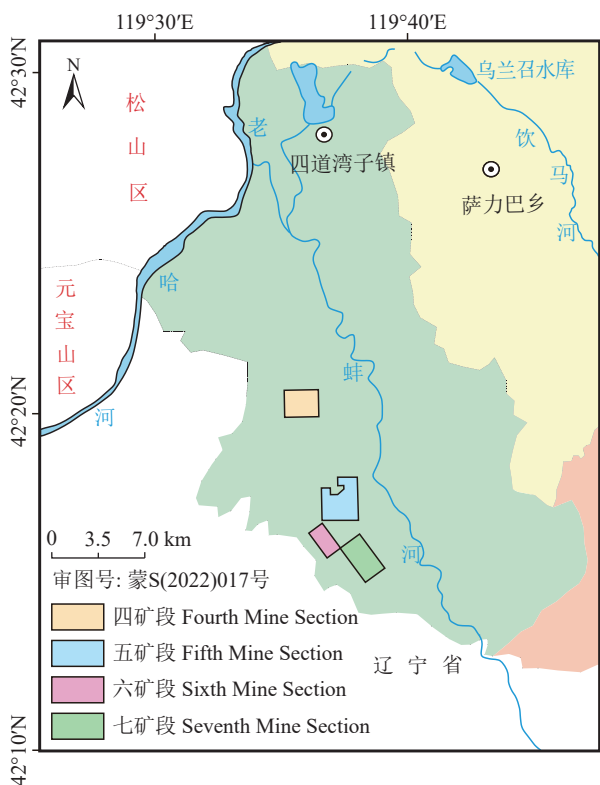


图 1 研究区交通位置图

Fig. 1 Traffic location map of study area

型以粉土为主,呈棕黄色,土壤结构不明显,砂砾含量较少。

矿区内植被稀少,覆盖率约 30%,主要为天然草地,部分土地被垦植为农田和人工林。

矿区地层岩性简单,地质构造稳定,坡缓沟浅,降水量较少,但由于矿区土壤类型为粉土,土质较松散,加之北方大风天数较多,容易引起土地沙化等环境问题。

1.6 社会经济

矿区当地居民以蒙古族、汉族、回族等为主,经济上以农业为主,兼有少量牧业,农作物有谷、黍、玉米等,牧业有牛、羊等。工业不发达,采矿业为当地主要工业,矿山以金厂沟梁和撰山子金矿为主体,年产黄金可达吨级。四道湾子镇人口约 1 万人,撰山子矿区极大地解决了当地的就业问题。

2 技术方法与技术手段

2.1 数据来源

撰山子矿区资源可利用量数据来源于撰山子矿区资源储量核实报告,土地沙化敏感性及水土流失敏感性评价所涉及的气候数据(降雨量、蒸发量、风速)来源于国家气象科学数据中心、土壤数据来源于基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集,植被覆盖度数据来源于资源环境科学与数据中心,矿业开发指数评价所涉及的矿业开发工业增加值、矿业从业人数、采矿破坏面积、产能等数据来自于撰山子矿区环境影响报告书,其他相关数据均来自赤峰市敖汉旗统计年鉴。

2.2 指标体系构建

本文针对撰山子矿区的资源环境承载能力评价主要以国土资源环境承载力评价技术要求(试行)技术规范为依托,以“资源环境承载能力协调理论(李瑞敏等, 2020)”为指导思想,并且针对矿区资源环境承载能力评价,创新性地引入环境本底评价,进而形成“资源+环境+社会”的多元评价体系,使自然资源环境系统与社会经济系统之间联系更加紧密,评价结果更加符合生态文明建设下的可持续发展理论。

根据对撰山子矿区的地质概况分析,本着科学性、系统性、可操作性的原则,构建矿区资源环境承载力评价指标体系,主要包括目标层、准则层、指标层 3 个层次(武立新等, 2009)。第一层是目标层,是整个评价指标体系的最高层次,主要分为 3 个部分,

分别为资源承载本底评价、环境承载本底评价及承载状态评价,反映了矿区资源环境承载力整体水平。第二层是准则层,包括若干个对矿区资源环境承载力水平起制约作用的子系统,该层决定了撰山子矿区资源环境承载力的综合能力;包含 5 项指标,分别为矿产资源承载力、地质环境承载力、生态环境承载力及矿业开发指数。第三层是指标层,是描述撰山子矿区资源环境承载力状况的基础性指标,这一层是根据第二层每一项指标的性质选取若干个基础性指标。指标体系见表 1。

2.3 评价方法

2.3.1 资源承载本底评价

矿产资源承载本底评价指标选用矿产资源的资源可利用量占比来表示。计算公式如下:

$$P_{ro} = \frac{R_i}{R_T} \times 100\% \tag{1}$$

式中: P_{ro} 为矿区资源可利用量占比; R_i 为被评价矿区矿产资源保有储量; R_T 为被评价矿区所在区域的矿产资源保有储量。

根据计算结果对承载本底进行分级,为加强研究区内部评价区块对比,本文在国土资源环境承载力评价技术要求(试行)的基础上,结合专家意见,得到分级标准(表 2)。

2.3.2 环境承载本底评价

矿区环境承载本底评价采用多指标共同参与评价的方法。首先针对研究区特点,选择相对应的评价指标进行单指标评价,在完成单指标评价的基础上,采用最小因子限制法对各评价单元资源承载力进行判定,对于矿区环境承载力综合评价采取“短板

表 1 矿区资源环境承载力评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of resource and environment carrying capacity in mining area

目标层	准则层	指标层
资源本底	矿产资源	资源可利用量占比
	地质环境	崩滑流地质灾害易发性
环境本底	生态环境	水土流失敏感性
		土地沙化敏感性
承载状态	矿业开发指数	采矿破坏指数
		废物排放强度
		矿区经济占比指数
		矿区就业指数

表 2 矿区资源承载本底分级标准

Table 2 Classification standard of resource environment bearing background in mining area

承载本底等级	资源可以利用量占比/%
高	≥ 10
中	[5, 10)
低	< 5

原理”进行综合集成, 评价等级划分标准见表 3。

2.3.3 承载状态评价

矿产资源承载状态评价利用矿业开发指数 (MDI) 反映评价区域上可利用矿产资源适宜开发的整体状况。包括矿业经济占比指数、矿业就业指数、采矿破坏指数、废物排放强度 4 个分指数。分别反映被评价区域内矿业开发过程中, 工业增加值对该区域 GDP 的重要程度、影响人口就业程度、对区域的破坏程度及承载的废物排放压力。

矿业开发指数计算公式为:

$$MDI = E_m w_1 + J_m w_2 + w_3 (100 - I_{mdb}) + w_4 (100 - T_{PDQ})$$

式中: MDI 为矿业开发指数, 数值范围为 0~100; E_m 、 J_m 、 I_{mdb} 、 T_{PDQ} 分别为矿业经济占比指数、矿业就业指数、采矿破坏指数、废物排放强度, w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 分别为矿业经济占比指数、矿业就业指数、采矿破坏指数、废物排放强度的权重。

将选取的指标两两比较, 建立权重矩阵, 并通过一致性检验。得到的各项评价指标权重见表 4。

在完成上述评价的基础上, 对矿产资源承载状态进行综合评价, 承载状态等级划分为盈余、均衡、超载 3 个等级, 划分标准见表 5。

2.3.4 综合评价

在完成资源承载本底、环境承载本底、承载状态评价的基础上, 采用层次分析法与线性加权指数模型相结合的方法, 开展矿区资源环境承载力综合

表 3 矿区环境承载力综合评价等级划分标准

Table 3 Classification criteria for comprehensive evaluation of environmental carrying capacity in mining areas

地质灾害易发性	土地沙化	水土流失	承载力
低易发	一般敏感	一般敏感	高
中易发	敏感	敏感	中
高易发	极敏感	极敏感	低

评价。

(1) 分析各因素之间的关系, 利用层次分析法, 建立层次结构模型, 构造两两比较的判断矩阵, 确立指标权重。对各指标权重进行一致性检验, 检验结果 $CR=0.0516$; < 0.1 , 具有很好的一致性, 各指标权重计算结果见表 6。

(2) 根据矿区资源承载本底、环境承载本底和承载状态评价结果情况, 结合专家意见, 对其评价结果赋值打分 (表 7)。

(3) 利用加权指数模型对各个子系统进行叠加:

$$S = \sum_{i=1}^n A_i B_i \quad (2)$$

式中: S 为评价目标总得分; A_i 为第 i 个子系统

表 4 各项评价指标权重

Table 4 Weight of each evaluation index

评价指标	矿业经济占比指数	矿业就业指数	采矿破坏指数	废物排放强度
权重	0.2	0.3	0.25	0.25

表 5 矿产资源承载状态评价分级标准

Table 5 Evaluation and classification standards of mineral resources bearing state

评价指标	盈余	均衡	超载
矿业开发指数	$MDI > 80$	$60 \leq MDI < 80$	$MDI < 60$

表 6 矿区地质环境承载力评价体系及其权重

Table 6 Evaluation system and weight of geological environment bearing capacity in mining area

指标	权重
资源本底承载	0.49
环境本底承载	0.2
承载状态	0.31

表 7 矿区资源环境承载力评价赋值

Table 7 Evaluation table of resource and environment bearing capacity of mining area

资源承载本底	环境承载本底	承载状态	赋值
高	高	盈余	5
中	中	均衡	3
低	低	超载	1

的量化分值; B_i 为第*i*个子系统的权重。

(4)根据评价目标总得分,将矿区资源环境承载力评估结果分为3级(表8)。

3 评价结果

3.1 资源承载本底

将计算得到的资源可利用量占比结果按照矿区资源承载本底分级标准进行分级。根据计算结果(表9),六矿段、七矿段的承载本底为“高”,五矿段承载本底为“中”,四矿段承载本底为“低”。整体来说,撰山子矿区4个矿段的承载本底水平高,金矿资源矿产储量丰富,自然禀赋条件较好,可开采量充足,具有良好的矿产开发优势。

3.2 环境承载本底

(1)地质环境质量评价

经过现场调查及查阅资料,矿区位于低山丘陵区 and 沟谷区,沟谷发育一般,纵坡小,流域面积小,相对高差小,矿业活动未在研究区冲沟内引发泥石流地质灾害。参照《地质灾害危险性评估规范》(DZ/T0286—2015),研究区为地质灾害低易发区(姜慧琴和李云鹏,2023),综合研判撰山子矿区四、五、六、七矿段地质环境承载力等级均为高。

(2)生态环境评价

根据《生态红线划定指南》计算结果,研究区内水土流失敏感性(龙蓉华等,2021)和土地沙化敏感性(胡梦甜等,2021)均为敏感区,生态环境较脆弱,矿区地处低山丘陵区 and 沟谷区,基岩大部分裸露,第四系多分布在沟谷内,矿区内沟谷发育一般,地势较平缓,此外,研究区年降雨量仅为433 mm,形成水土流失及土地沙化的诱因较少。经过综合研判,撰山子矿区四、五、六、七矿段生态环境承载力等级均为“中”。

(3)环境承载本底评价

根据计算结果,撰山子矿区(四、五、六、七矿段)矿区环境承载本底等级为“中”(表10)。总体来说,撰山子矿区4个矿段承载本底等级水平较高,研

究区地质灾害不发育,属于地质灾害低易发区,同时受地形地貌、降雨量、蒸散发量、干燥度等指标共同影响,水土流失、土地沙化敏感性中等,不易发生水土流失、土地沙化等环境地质问题,为矿业开发打下了良好的环境基础。

3.3 承载状态评价

从承载状态结果看(表11),撰山子矿区(四、五、六、七矿段)的矿业开发指数分别为77.87、67.09、83.10、77.22。4个矿段的矿业开发指数相差不大,其中四、五、七3个矿段处于均衡状态、六矿段处于盈余状态,矿区整体承载状态处于健康水准,未对周边环境产生明显的影响,矿区社会经济水平满足矿业开发条件。具体来看,从采矿破坏指数的角度,撰山子矿区4个矿段的采矿破坏指数都未超过50,表明金矿开采活动对矿区及周边地区影响较小;从废物排放强度的角度,撰山子矿区4个矿段属于金矿,开采强度为200 t/a,开采强度小于600 t/a,开采的矿石和废石化学成分基本稳定,无放射性和其他环境地质隐患,也无重大的污染源,污染排放系数较小,表明撰山子矿区在生产过程中,需严格执行既定污染物排放清单标准;从矿业经济指标的角度,由于受矿产资源储量及品位所限,四、五矿段的经济指标较低,针对四、五矿段应该改进开采计划,提高

表9 撰山子矿区各矿段资源量可利用量占比情况

Table 9 The proportion of available resources in each section of Zhuanshanzi mining area

矿段	矿段可采 储量/t	矿区资源可采 储量/t	资源可利用量 占比/%	承载本底 等级
四矿段	0.075	5.046	1.49	低
五矿段	0.308		6.11	中
六矿段	2.748		54.52	高
七矿段	1.915		38.00	高

表10 矿区环境承载本底评价

Table 10 Mine environment bearing background assessment table

矿段	地质环境	生态环境	环境本底评价
四矿段	高	中	中
五矿段	高	中	中
六矿段	高	中	中
七矿段	高	中	中

表8 矿区资源环境承载力评价赋值

Table 8 Evaluation table of resource and environment bearing capacity of mining area

分级赋值	低	中	高
分级标准	1~2.1	2.1~3.5	>3.5

开采工作效果,降低开采成本,提升经济效益。

3.4 综合评价

根据矿区资源环境承载能力评价指标体系,分别以占比方法、最小因子限制法、线性加权指数模型法对资源承载本底、环境承载本底、承载状态 3 个子系统进行有针对性的评价。以各矿段资源可利用量表征矿区资源承载本底评价能力,可操作性强,评价结果更加直观;以最小因子限制法评价矿区环境承载本底,得出的评价结果更加科学,更加符合绿色矿山的发展理念;以线性加权指数模型评价矿区承载状态,评价过程更加系统,利用线性加权的方法将多元素的社会经济因子融入矿区承载状态评价中,评价结果更具有现实意义。

在资源承载本底、环境承载本底和承载状态评价的基础上,进行矿区资源环境承载力综合评价。以撰山子矿区 4 个矿段作为评价单元,进行综合评判,得到矿区资源环境承载力等级。其中四矿段承载等级为“中”,五、六、七矿段承载等级为“高”,矿区整体资源环境承载力等级为“高”(表 12)。

根据评价结果,矿区整体资源环境本底丰富,具有较好的抗干扰能力,现阶段矿区开发程度对社会环境的影响尚在矿区开发承载极限内,具有支撑矿产资源开发的可行性。通过对各个矿段综合评价得分进行分析:六矿段得分最高,其次为七矿段、五矿段,四矿段得分最低。四矿段主要受矿产资源储量

的限制,矿产资源可利用量低,矿业开发指数也相应较低,其次受地理位置及季节性气候的影响,可能会引起水土流失、土地沙化等地质问题,因此四矿段综合得分最低;五矿段矿产资源储量一般,但矿山活动较少,相应造成的土地损毁程度和地质灾害易发性也较低,矿区基本保持原生地形地貌,七矿段矿产资源储量丰富,矿区活动较频繁,矿业开发指数相对较高,但同时频繁的矿区活动也对环境造成了一定的影响,因此五矿段、七矿段得分中等;六矿段矿产资源最丰富,矿业开发指数最高,因此得分最高,未来矿区正式开采可以参照承载力得分大小进行开发。撰山子矿区整体资源环境承载力等级为高,从资源承载本底看,撰山子矿区具有优质的资源禀赋条件,撰山子矿区不仅储量较大,而且矿石品位高,属于国内当前少有的高品位富矿床;从环境承载本底看,研究区地势平缓,气候环境稳定,年降雨量较低,具有稳定的开采环境;从承载状态看,敖汉旗以农牧业为主,工业不发达,采矿业为主要工业,撰山子矿区是当地支柱产业,极大地解决了当地就业问题,与此同时,撰山子矿区目前位列国家绿色矿山名录。目前矿区资源环境承载状况较好,这得益于矿区所采取的科学的矿业开发方式和环境治理措施,但在未来的矿业开发过程中,仍要坚持走绿色矿山道路,实现矿业经济的可持续发展,进而更好地服务生态文明建设。

表 11 撰山子矿区矿业开发指数

Table 11 Mining development index of Zhuanshanzi mining area

指标	经济占比指数	就业指数	采矿破坏指数	主要污染物排放强度	矿业开发指数	承载状态等级
四矿段	1.49	100	0	9.72	77.87	均衡
五矿段	6.1	100	46.79	9.72	67.09	均衡
六矿段	54.46	100	21.45	9.72	83.10	盈余
七矿段	37.95	100	31.76	9.72	77.22	均衡

表 12 撰山子矿区资源环境承载力等级

Table 12 Resource and environment bearing capacity grade of Zhuanshanzi mine area

指标	资源承载本底	环境承载本底	承载状态	综合评价	承载等级
四矿段	低	中	均衡	2.02	低
五矿段	中	中	均衡	3.00	中
六矿段	高	中	盈余	4.60	高
七矿段	高	中	均衡	3.98	高
矿区	高	中	均衡	3.98	高

4 结 论

(1)根据对撰山子矿区地质概况分析,构建撰山子矿区“资源+环境+社会”的评价指标体系,并基于层次分析法、加权指数模型、最小限制因子法等多种方法,完成了撰山子矿区资源环境承载力评价,分析评价了矿区资源承载状态,探索了未来矿区开发的可行性。根据评价结果,证明此评价方法相对客观合理,为今后矿区资源环境承载力研究提供依据。

(2)从资源承载本底评价结果看,四矿段承载力最低,六矿段承载力最高,说明四矿段矿产资源可利用量最低;从环境承载本底评价结果看,四、五、六、七各矿段承载力等级相同,该指标主要受生态环境承载力的影响,说明矿区地质环境、生态环境稳定,为矿区开发打下了良好的环境基础;从承载状态评价结果看,六矿段承载力最高,四、五、七矿段承载力等级相同,说明矿区承载状态均未超载,未对周边环境产生明显的影响,矿区社会经济水平满足矿业开发条件。

(3)撰山子矿区整体资源环境承载力处于高水平,其中四矿段承载力为“低”、五矿段资源环境承载力等级为“中”,六、七矿段资源环境承载力等级为“高”。说明矿区各矿段资源环境现状良好,能够承受采矿活动,建议未来矿区正式开采可以参照承载力得分大小,按照六矿段—七矿段—五矿段—四矿段的开发顺序进行开发,并在现有综合治理方案的管理下,伴随矿区生态修复措施同步进行,采矿活动不会对采矿区周围环境造成严重破坏。

References

- Bu J W, Sun Z Y, Zhou A G, et al. 2016. Review on mining geo-environmental carrying capacity research in China[J]. China Mining Magazine, 25(1): 61–68,77(in Chinese with English abstract).
- Chen W L, Zhao L, Zhang J, et al. 2023. A study on the water resources carrying capacity of Yingkou City based on ecological footprint method[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 43(7): 52–57(in Chinese with English abstract).
- Guan Y B, Xu D J, Guo C Y. 2012. Evaluation on the carrying capacity of coal mining geo-environment in Handan mining area[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 31(4): 474–478(in Chinese with English abstract).
- Guo J H, Liu K, Deng Y F, et al. 2023. Geological Suitability evaluation of underground space resources based on the entropy weight optimization method[J]. Geological Bulletin of China, 42(2/3): 385–396(in Chinese with English abstract).
- Hadwen S, Palmer L J. 1922. Reindeer in Alaska[M]. US Department of Agriculture, 1089: 1–70.
- Hu M T, Zhang H, Gao J X, et al. 2021. RWEQ-Based assessment on sensitivity of land desertification[J]. Research of Soiland Water Conservation, 28(1): 368–372(in Chinese with English abstract).
- Jiang H Q, Li Y P. 2023. Evaluation of geological hazard-prone areas in Togtoh County, Inner Mongolia autonomous region[J]. Inner Mongolia Water Resources, (6): 52–53(in Chinese).
- Li R M, Yin Z Q, Li X L, et al. 2020. A study of the coordination theory and evaluation method of resource environment carrying capacity[J]. Geological Bulletin of China, 39(1): 80–87(in Chinese with English abstract).
- Liu Y Y, Zhou D. 2014. Analysis on villages ecological capacity in the gully region of the loess plateau based on limiting factor method[J]. Huazhong Architecture, 32(11): 100–103(in Chinese with English abstract).
- Long R H, Sun H, Xu Y Y. 2021. Assessment of sensitivity of soil and water loss in rocky desertification ecologically vulnerable area, southwest Guizhou[J]. Ecological Science, 40(6): 133–139(in Chinese with English abstract).
- Lu R X, Xiao S S, Dong Y H et al. 2018. A study on the evaluation of resource and environmental carrying capacity based on analytic hierarchy process: A case study of Zhenjiang City[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 46(9): 268–272(in Chinese).
- Park R E, Ernest W B. 1921. Introduction to the science of sociology[M]. Chicago: The University of Chicago Press.
- Ran Q Z, Liao H P, Hong H K. 2022. Spatial and temporal characteristics of water resources carrying capacity and carrying state in Chongqing[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 44(7): 169–183(in Chinese with English abstract).
- Ren J L, Chang J, Zhang X Q, et al. 2013. Research on the comprehensive carrying capacity of resources and environment in the Yellow River Delta Efficient Ecological Economic Zone[J]. Shandong Social Sciences, (1): 140–145(in Chinese).
- Saaty T L. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures[J]. Journal of Mathematical Psychology, 15(3): 234–281.
- Sun X B, Cui J, Dai Y J, et al. 2022. Research on the evaluation of land resource carrying capacity in Jinzhou region, Liaoning[J]. Geological Bulletin of China, 41(8): 1487–1493(in Chinese with English abstract).
- Wang B C. 2022. Evaluation and analysis of beargin capacity of water resourcesin Fuxin city[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 50(7): 188–192,233(in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhao W. 2020. A case study on evaluation of regional resources and environment carrying capacity in foreign countries[J]. Journal of Hebei University of Environmental Engineering, 30(3): 21–26,40(in Chinese).
- Wu L X, Wang J G, Yang J Z. 2009. Application of analytic hierarchy process in assessment of landslide danger degree[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 61(4): 66–69(in Chinese with English abstract).

- Wu W X, Tian C X, Liu L, et al. 2022. Research on environmental carrying capacity of mineral resources development in Xianning city[J]. *Modern Mining*, 38(5): 192–196(in Chinese with English abstract).
- Xu W H, Luo T, Liu J. 2020. Establishment and evaluation of county-level resources and environmental carrying capacity based on system dynamics[J]. *Environmental Science and Technology*, 43(8): 192–199(in Chinese with English abstract).
- Yang B X, Gu Y Y, Li S L, et al. 2023. Automatic evaluation method of water resources carrying capacity of Hainan island based on random forest algorithm[J]. *Journal of Hainan Tropical Ocean University*, 30(5): 82–90(in Chinese with English abstract).
- Yan C Z. 1992. Discussion on the mineralization law of Chuanshanzi gold deposit in Inner Mongolia[J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, (Z1): 187–190(in Chinese).
- Zhao L J, Ye Zh Y, Wu H Z, et al. 2023. Present situation and consideration of green mine construction in Inner Mongolia[J]. *Modern Mining*, 39(4): 148–150, 154(in Chinese with English abstract).
- 价[J]. *内蒙古水利*, (6): 52–53.
- 李瑞敏, 殷志强, 李小磊, 等. 2020. 资源环境承载协调理论与评价方法[J]. *地质通报*, 39(1): 80–87.
- 刘玉玉, 周典. 2014. 基于限制因子法的渭北黄土高原沟壑区村落生态承载力分析研究[J]. *华中建筑*, 32(11): 100–103.
- 龙蓉华, 孙虎, 徐嵩尧. 2021. 黔西南石漠化生态脆弱区水土流失敏感性评价[J]. *生态科学*, 40(6): 133–139.
- 吕若曦, 肖思思, 董燕红, 等. 2018. 基于层次分析法的资源环境承载力评价研究——以镇江市为例[J]. *江苏农业科学*, 46(9): 268–272.
- 冉启智, 廖和平, 洪惠坤. 2022. 重庆市水资源承载力时空特征与承载状态[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 44(7): 169–183.
- 任建兰, 常军, 张晓青, 等. 2013. 黄河三角洲高效生态经济区资源环境综合承载力研究[J]. *山东社会科学*, (1): 140–145.
- 孙秀波, 崔健, 代雅建, 等. 2022. 辽宁锦州地区土地资源承载力评价[J]. *地质通报*, 41(8): 1487–1493.
- 王宝琛. 2022. 阜新市水资源承载力评价分析[J]. *黑龙江水利科技*, 50(7): 188–192, 233.
- 王秦, 赵玮. 2020. 国外区域资源环境承载力评价的实践案例研究[J]. *河北环境工程学院学报*, 30(3): 21–26, 40.
- 武立新, 王建国, 杨计准. 2009. 层次分析法在山体滑坡危险度评价中的应用[J]. *有色金属(矿山部分)*, 61(4): 66–69.
- 武文秀, 田彩霞, 刘莉, 等. 2022. 咸宁市矿产资源开发环境承载力研究[J]. *现代矿业*, 38(5): 192–196.
- 许文豪, 罗涛, 刘江. 2020. 县域资源环境承载力系统动力学评价研究[J]. *环境科学与技术*, 43(8): 192–199.
- 杨博雄, 顾煜烨, 李社蕾, 等. 2023. 基于随机森林算法的海南岛水资源承载力自动评价方法[J]. *海南热带海洋学院学报*, 30(5): 82–90.
- 阴翠珍. 1992. 内蒙古撰山子金矿成矿规律探讨[J]. *贵金属地质*, (Z1): 187–190.
- 赵丽娟, 叶征宇, 武慧珍, 等. 2023. 内蒙古绿色矿山建设现状与思考[J]. *现代矿业*, 39(4): 148–150, 154.

附中文参考文献

- 补建伟, 孙自永, 周爱国, 等. 2016. 我国矿山地质环境承载力研究现状[J]. *中国矿业*, 25(1): 61–68, 77.
- 湛伟林, 赵磊, 张杰, 等. 2023. 基于生态足迹法的营口市水资源承载力研究[J]. *环境保护与循环经济*, 43(7): 52–57.
- 关英斌, 许道军, 郭婵妤. 2012. 邯郸矿区矿山地质环境承载力评价[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 31(4): 474–478.
- 郭骏瀚, 刘凯, 邓岳飞, 等. 2023. 基于熵权优化法的地下空间资源地质适宜性评价[J]. *地质通报*, 42(2/3): 385–396.
- 胡梦甜, 张慧, 高吉喜, 等. 2021. 基于 RWEQ 模型修正的土地沙化敏感性评价[J]. *水土保持研究*, 28(1): 368–372.
- 姜慧琴, 李云鹏. 2023. 内蒙古自治区托克托县地质灾害易发区评